第37卷 第6期
2020年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 37 No. 6
Nov. 2020

乌尔逊河流域春季水体氢氧同位素与水化学特征研究

郭子扬, 史小红, 李畅游, 赵胜男, 孙 标, 卢俊平, 韩知明

（内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,内蒙古 呼和浩特 010018）

摘 要：采用水化学与氢氧稳定同位素技术,通过现场测试和室内分析,对乌尔逊河流域不同类型水体的水化学和氢氧同位素特征进行分析,探讨了水化学和氢氧同位素在水文过程的指示作用。结果表明:流域内河水的水化学类型以Na·Ca-HCO_3型为主,地下水以Na-HCO_3、Na-HCO_3·Cl为主。流域内河水的水岩相互作用要强于地下水,主要离子来源于硅酸岩、石膏及白云岩的溶解沉淀;岩盐、钠、钾长石的风化溶解及部分人类活动的影响。离子受蒸发富集及岩石风化作用较明显,氢氧同位素研究指示出流域内河水与地下水的主要补给源之一均为大气降水,且研究区内的地表水受蒸发作用强于地下水。对研究区地下水及河水δD、$\delta^{18}O$、溶解性总固体TDS(Total Dissolved Solids)及Cl^-含量的沿程变化进行分析后明确地下水受径流、左侧基岩裂隙水及孔隙水的共同补给,且地下水也是乌尔逊河的主要补给来源之一,其对乌尔逊河上、中、下游补给比例分别是59.35%、55.90%和52.00%。

关键词：乌尔逊河流域；氢氧同位素；水化学特征；补给关系

河水化学组分是水与环境长期作用的结果,记录着水体来源、成因、储存状态等相关的信息及气候变化和人类活动的历史,对了解河水和地下水转化关系、水质评价和流域水资源管理具有重要意义[1-2]。水体中氢氧稳定同位素直接参与水循环,可用于解释河水与地下水相互作用关系[3]。目前对于水化学结合同位素技术更多的是用于研究水体之间相互转化关系的示踪剂,在判读降水-径流过程[4-5]、融冰雪水对径流的贡献[5-6]、地表水与地下水相互作用关系及其转化机制[7-8]等方面都有着广泛深入的应用。

乌尔逊河是连接呼伦湖与贝尔湖的重要纽带,其发源于蒙古国贝尔湖北岸,是我国第四大湖—呼伦湖的主要入湖河流之一。目前对于呼伦湖流域的研究只局限于呼伦湖[9]和克鲁伦河[10]。乌尔逊河虽与克鲁伦河同属一个生态系统,但两者还是存在差距,一是克鲁伦河流域氟离子超标,乌尔逊河流域则相反,氟离子符合国家饮用水标准;二是在采样过程中发现,乌尔逊河流域附近的井水水质较克鲁伦河差,且盐度偏高,有些井水盐度甚至可以达到4 $g\cdot L^{-1}$。受盐度较高的影响,当地牧民不选择井水进行牲畜的喂养及日常生活,因此河水就成为了当地唯一的饮用水来源,但畜牧业的发展又对沿岸河水水质的影响很大,综上研究乌尔逊河流域对当地水资源的合理开发利用十分重要。本文以乌尔逊河为研究对象,分析了研究区水样的水化学及氢氧稳定同位素,解释不同水体的水化学特征、氢氧同位素的沿程变化及地表水与地下水之间的转换关系,探讨氢氧稳定同位素在该区域水文过程中的指示作用,为合理开发利用当地流域水资源,维护河流生态系统和生态健康的基本功能提供重要的理论支持,同时也为地表水与地下水的补给研究提供一定的基础资料。

1 材料及方法

1.1 研究区概况

乌尔逊河,位于呼伦贝尔高原,全长223 km,流

收稿日期：2020-03-19； **修订日期**：2020-04-28
基金项目：中芬合作项目(2017YFE0114800);国家自然科学基金(51911530770,51669022,51669023);内蒙古自然科学基金(2019MS050320)资助
作者简介：郭子扬(1996-),女,硕士研究生,研究方向为水文地球化学. E-mail: gzy1096033962@163.com
通信作者：史小红. E-mail: imaushixiaohong@163.com

域面积10528 km²，流域地势西南部高，东北部低，海拔高程552～591 m。乌尔逊河流域属中温带大陆性季风气候，春季干旱多风，最大风力7～8级。夏季雨水集中，秋季气温急降，冬季漫长严寒，积雪期可达140 d左右。年平均气温0.2 ℃，年降水量约为280 mm。沿河两端分布有甘珠花、乌尔逊高勒嘎查、伊河呼热嘎查以及巴彦塔拉嘎查四个主要村落，主要以畜牧业为主，牧民及牲畜的饮用水主要来自河水。河宽随水量的多寡而变化，在多水期河宽一般在60～70 m，水深2～3 m，枯水期仅1 m左右，河底多由沙砾组成。乌尔逊河西部存在着嵯岗断层，且在入湖口附近被嵯岗断层横穿，河上游处于贝尔凹陷与乌尔逊凹陷之间，分布的是松散岩类孔隙水[11]。中游完全存在于乌尔逊凹陷中，该处主要岩石构造为上兴安岭火山岩与燕山初期花岗岩，在此多发育丘陵区裂隙潜水。乌尔逊河以东凹地地貌为冰成谷底，地面平坦，谷地中多沼泽湿地及季节性盐碱泡，风成沙丘和冰蚀凹地。乌尔逊河流域主要存在的是上部灰黑、黑褐色含砾亚粘土，下部黄褐色砂及砂砾石的第四系全新统冲击层。乌尔逊河两岸的地貌为河漫滩，由于河曲发育，漫滩表面被切割的支离破碎，多沼泽湿地、旧河道及牛轭湖。

1.2 样品采集与测定

2018年春季，在参考区域水文地质资料与乌尔逊河周边人口生产生活特征的基础上，研究小组沿着乌尔逊河两岸进行平行采样，收集了19个井水水样和19个河水水样。为方便后续研究，根据流域地形及水文地质条件，以嵯岗断层与乌尔逊凹陷相交处为界，将乌尔逊河从W16点处分为中、下游两段，乌尔逊凹陷与贝尔凹陷相交处(即R16点)以南定为上游进行分析，采样点位置见图1。首先用原水润洗3遍采样瓶，并将通过0.45 μm滤膜过滤的水样置于100 mL聚乙烯瓶中，用PARAFILM膜密封冷藏，及时运回实验室分析。

现场采用手持GPS确定采样点的经纬度，对河水及井水的溶解性总固体TDS(Total Dissolved Solids)、盐度、pH值、电导率均采用瑞士梅特勒多参数水质分析仪进行测定，水体氢氧稳定同位素采用美国(LGR DT100)液体同位素分析仪测定，δD、δ¹⁸O的测试精度分别为±0.3‰、±0.1‰；主要离子用精度为±5%的美国(ICS-90)离子色谱仪检测，在实验室

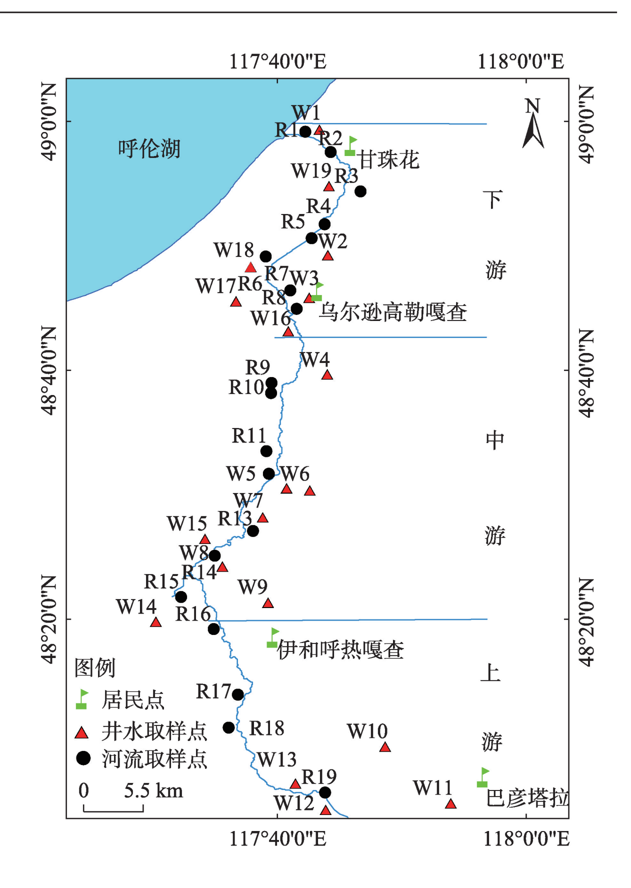


图1　乌尔逊河流域取样点分布图

Fig. 1　Distribution map of sampling points in the Wuerxun River Basin

用稀硫酸—甲基橙滴定法测定HCO_3^-质量浓度。

1.3 分析方法

1.3.1　水化学特征分析方法　利用Durov图判断水体的化学组成特征及水化学类型，借助离子比例系数法明确离子来源，采用Gibbs图定性分析水体水化学组成的控制机制。

1.3.2　转化比例计算　应用水化学和同位素质量平衡方法估算地下水和地表水的转换量[12]，如公式(1)所示。

$$Q_s \times C_s = Q_u \times C_u + (Q_s - Q_u) \times C_v \tag{1}$$

式中：Q_s为混合后水体的流量；Q_u为混合前水体的流量。C_s为混合后水体中示踪剂的浓度；C_u、C_v为混合前水体中示踪剂的浓度，示踪剂可以为Cl^-、δD、$\delta^{18}O$和电导率；水体混合前后的径流满足公式(1)。由此可以根据根据公式(2)和公式(3)计算出地下水(f_u)和地表水(f_v)的转换比例。

$$f_u = \frac{Q_u}{Q_s} \times 100\% = \frac{C_s - C_v}{C_u - C_v} \tag{2}$$

$$f_v = \frac{Q_v}{Q_s} \times 100\% = \frac{C_s - C_u}{C_v - C_u} \tag{3}$$

2 结果分析

2.1 不同水体水化学特征分析

地下水与河水相比，TDS比较小（表1）。河水TDS的变化范围在89.3～127.7 mg·L^{-1}，变异系数为0.252，说明河水的TDS总体上变化不大，比较稳定，且TDS的均值在178.9 mg·L^{-1} < 1000 mg·L^{-1}，河水水体为低矿化度水体。地下水TDS的变化范围在221～4730 mg·L^{-1}，变异系数为0.867，表明地下水TDS的变化较明显，且与离子浓度标准差很大，也反映出地下水水化学组成有所差异。河水与地下水的pH是8.6、7.9，为弱碱性水体。

河水中阳离子浓度呈现$Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$，阴离子浓度为$HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$。优势阳离子$Na^+$、$Ca^{2+}$的平均浓度分别是34.38 mg·L^{-1}、20.81 mg·L^{-1}，共占阳离子浓度的77%以上。优势阴离子为HCO_3^-、Cl^-，平均浓度为97.65 mg·L^{-1}、33.48 mg·L^{-1}，占阴离子的72%以上。由图2可知，河水的水化学类型以Na·Ca-HCO_3型为主。地下水中阳离子浓度为$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$，阴离子浓度为$HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$。优势阳离子$Na^+$、$Mg^{2+}$的平均浓度为528.59 mg·L^{-1}、61.81 mg·L^{-1}，共占阳离子浓度的64%以上，优势阴离子为HCO_3^-、Cl^-，平均浓度为572.28 mg·L^{-1}、138.97 mg·L^{-1}，共占阳离子浓度的

表1 乌尔逊河流域下游不同水体水化学分析结果

Tab. 1 Results of water chemical analysis of different water bodies in the lower reaches of the Wuerxun River Basin

类型	统计量	pH	TDS/(mg·L^{-1})	水化学/(mg·L^{-1})							同位素/‰			
				Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	δD	$\delta^{18}O$	*d*
河水19个	最大值	9.205	127.7	55.67	4.14	15.43	27.40	38.82	11.40	158.49	5.23	−75.85	−8.28	9.62
	平均值	8.575	178.9	34.38	2.93	11.33	20.81	33.48	9.49	97.65	3.88	−85.24	−12.64	−4.29
	最小值	7.948	89.3	5.43	1.05	3.80	13.68	26.63	7.01	33.86	1.59	−89.85	−10.98	−0.64
	标准差	0.399	45.1	12.69	0.91	3.16	3.85	3.65	1.23	40.0	0.95	4.07	0.67	2.61
井水19个	最大值	8.953	4730.0	1865.77	6.98	222.19	136.62	421.54	183.10	994.48	211.25	−89.03	−11.58	−1.44
	平均值	7.980	1658.9	528.59	3.45	61.81	51.24	138.97	77.13	572.2	61.63	−96.55	−12.64	−4.55
	最小值	7.390	221.0	41.77	1.06	11.66	13.73	17.34	1.10	21.69	1.54	−112.30	−14.96	−7.52
	标准差	0.320	1438.8	521.61	1.65	58.32	30.92	129.51	63.00	327.53	66.21	6.34	0.95	1.83

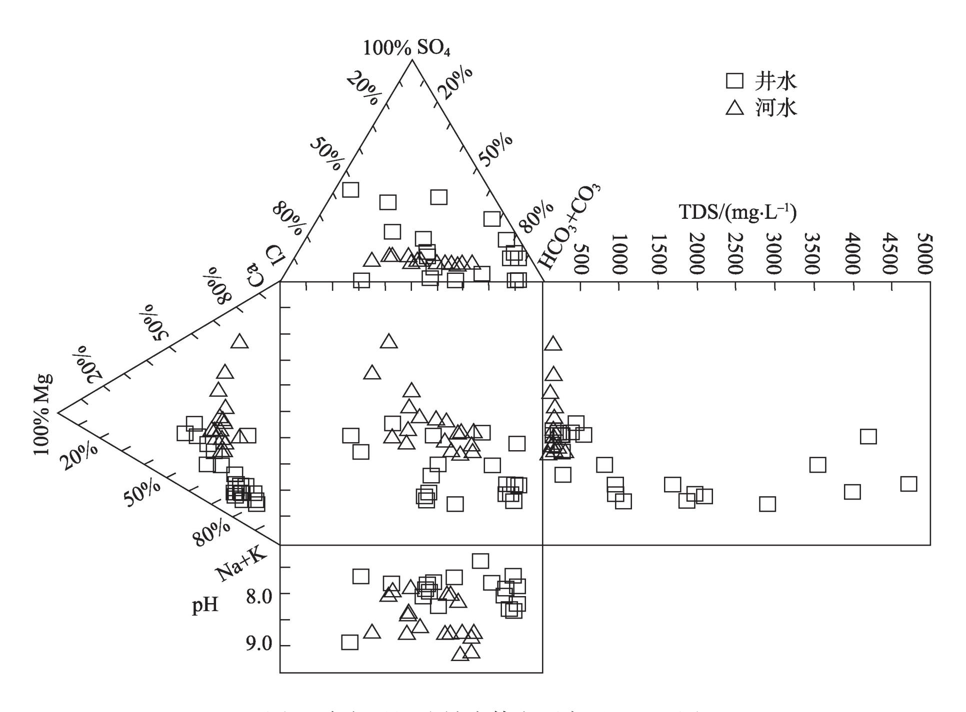


图2 乌尔逊河流域水体主要离子Durov图

Fig. 2 The main ion Durov diagram of the water body in the Wuerxun River Basin

62%以上。离子组成复杂，地下水的水化学类型有Na-HCO_3和Na-HCO_3·Cl两种，共占地下水中所有水化学类型的63%。

2.2 不同水体氢氧同位素分析

根据测试结果可知(表1)，地下水δD值和δ^{18}O分别为-112.3‰～-89.03‰、-14.96‰～-11.58‰，均值为-96.55‰、-12.64‰；河水δD值和δ^{18}O分别为-89.85‰～-75.85‰、-10.98‰～-8.28‰，均值为-85.24‰、-10.24‰。由于各地区大气降水云气形成时，水汽的来源及降水云气的运移过程中环境条件的变化，导致气、液相同位素分馏的不平衡程度产生差异，进而使不同地区大气降水线与全球大气降水线在斜率和截距上均有不同程度的偏离，这种偏离程度可以用氘盈余(d = δD-8δ^{18}O)来量化[13]。当水体渗入地下后，其不同氢氧同位素组成，通过混合、交换，将趋于一个平均同位素组成。乌尔逊流域河水氘盈余的变化范围在-0.64‰～-9.62‰，均值为3.30‰；地下水氘盈余的变化范围在1.44‰～7.52‰，均值为4.55‰。

3 讨论

3.1 水岩作用

3.1.1 河水及地下水水岩相互作用分析　水-岩作用是控制地下水水化学组成的重要因素，水中Ca/Na和Mg/Na摩尔浓度比值常用于水-岩相互作用研究[14]，其中硅酸盐主导的地区水-岩作用结果是水体Ca/Na和Mg/Na摩尔浓度比值分别为0.4、0.2[15]。研究区地下水中Ca/Na摩尔浓度比值的范围在0.07～0.65，均值为0.25；河水中Ca/Na摩尔浓度比值的范围在0.33～0.76之间，均值为0.55。Mg/Na摩尔浓度比值的范围在0.07～0.64之间，均值为0.23；河水中Mg/Na摩尔浓度比值的范围在0.12～0.34之间，均值为0.28。该地区地下水和河水的Ca/Na和Mg/Na摩尔浓度比值比较小，表明地下水和河水主要受硅酸盐矿物溶解主导，且河水受水-岩相互作用的程度要强于地下水。

通过计算当地大气降水的氘盈余值(表1)，发现河水及地下水的氘盈余值均较降水偏小，尤其河水的氘盈余值更低，考虑出现这种情况的原因是由于氘盈余值也可以表征水-岩作用的强度[16]，而岩石或地层中的氢化学组分含量很低，不足以影响水体的氘盈余值，但水-岩的氧同位素交换可以导致水体中δ^{18}O含量增加，使得地下水及河水相对于大气降水氘盈余更小[17-18]。同时也反映出河水较地下水的水-岩相互作用更显著，这与水化学分析出的结果一致。

3.1.2 主要离子来源分析　综合对比研究地下水及河水中各离子含量间的比例系数特性可以用来推断水体水化学元素的来源和生成过程，相比传统的水化学分析方式的单一性，离子比例系数分析更能够深入阐述和描绘水体水化学元素的演变过程及其特性[19]。$\gamma(Na^+ + K^+)/\gamma(Cl^-)$系数是最常用的水体成因比例系数，其数值用来表征水体中Na^+富集程度[20]，由图3a可知地下水与河水的$\gamma(Na^+)+\gamma(K^+)/\gamma(Cl^-)>1$，说明在地下水与河水的水-岩相互作用过程中，$Na^+$+$K^+$从钠长石、钾长石的硅酸盐矿物中释放出来；此外也可以间接说明蒸发在地下水及河水盐分方面逐渐占据主导。但由图3a可知地下水中$\gamma(Na^+)+\gamma(K^+)/\gamma(Cl^-)$的比值更大，表明$Na^+$+$K^+$的含量明显高于$Cl^-$，这也从另一方面表明地下水中$Na^+$+$K^+$含量的增加除了受水-岩相互作用还可能受离子交换

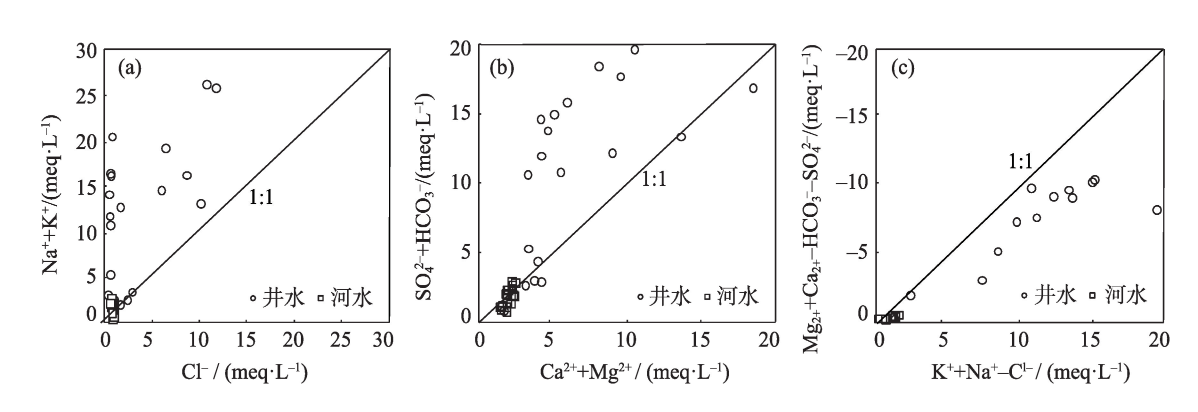


图3　乌尔逊河流域离子含量关系

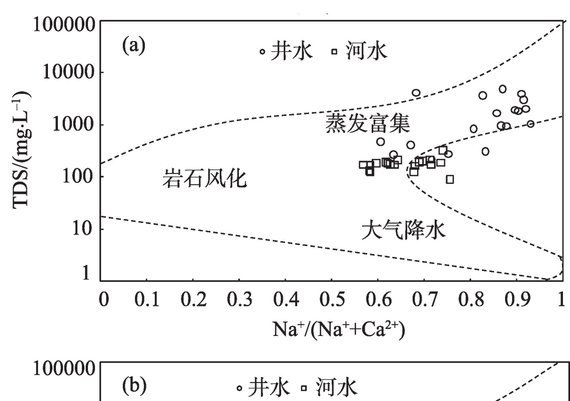
Fig. 3　Diagram of ion content in the Wuerxun River Basin

作用的影响，阳离子之间发生了交换，使得 Na^++K^+ 含量增加，而河水中 Na^++K^+ 的含量与 Cl^- 含量相差不大，说明河水中阳离子交换作用不明显。$\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^-)+\gamma(SO_4^{2-})$ 系数可以用来判断水体中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的主要来源，如图3b所示，河水中所有取样点及地下水中大部分采样点 $\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^-)+\gamma(SO_4^{2-})<1$，说明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于硅酸岩和蒸发岩的溶解，而地下水中有些取样点的 Ca^{2+}、Mg^{2+} 含量明显大于 HCO_3^-、SO_4^{2-}，说明在开放的体系中 CO_2 进入水体，使与石膏共存且难溶的白云石发生风化-溶滤反应，这一部分的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 就是源于此。由图3c可知，$\gamma(Na^+)+\gamma(K^+)-\gamma(Cl^-)/\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})-\gamma(HCO_3^-)\gamma(SO_4^{2-})$ 的比值为负，说明 Na^+、K^+、Cl^- 和 Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-} 和 SO_4^{2-} 呈现明显的负相关，同时地下水中所有的取样点均在斜率为-1处附近，说明研究区地下水发生了较为强烈的阳离子交换作用。在地下水径流过程中，通过水-岩的相互作用，岩土中吸附的 Na^+、K^+ 与水体中存在的 Ca^{2+}、Mg^{2+} 发生置换作用，使得水体中的 Na^+、K^+ 含量增加，而 Ca^{2+}、Mg^{2+} 含量减少，而河水大多数取样点的 $\gamma(Na^+)+\gamma(K^+)-\gamma(Cl^-)/\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})-\gamma(HCO_3^-)\gamma(SO_4^{2-})<-1$，说明河水中受阳离子交换作用不显著，从而验证了图3a。

乌尔逊流域含有丰富的煤炭、石油、芒硝和石膏等资源，并结合上文的分析，明确研究区地下水及河水中 Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 主要来源于硅酸岩、石膏及白云岩的溶解和沉淀；Na^+、K^+、Cl^- 主要来源于岩盐、钠、钾长石的风化和溶解。由于乌尔逊河流域以畜牧业为主，工业及交通等较为落后，牧民的日常生活燃料的选择以牛粪为主，因此 NO_3^- 的来源不是煤炭等化石燃料。乌尔逊河周边散布的村落虽没有克鲁伦河附近的多，但牧民对于干草的贮存均采用露天式堆放，干草中硝酸盐含量在 31.00～71.27 $mg\cdot kg^{-1}$，亚硝酸盐含量在 0.10～2.45 $mg\cdot kg^{-1}$[21]，考虑随着降雪、降雨过程，干草和牲畜粪便中的氮进入土壤，在接下来的化学反应中氮以硝酸盐的形式存在于水中，随着径流流入河水或渗入地下[22]，因此，NO_3^- 主要与畜牧业的养殖等人类活动有关。

3.2 蒸发作用

水化学组分的形成受气候条件、水文地质条件、人为输入等多种因素共同影响，其主要形成作用有溶滤、氧化还原、阳离子交换等[23-25]。Gibbs模型可用于区分天然水化学成分的主要来源。由于大气降雨中 Cl^- 质量浓度一般不超过 30×10^{-3} $mmol\cdot L^{-1}$[26]，远远低于乌尔逊河流域平均含量，因此认为大气降水对该研究区的水化学组分影响较小。由图4可以看出，部分水体落在了Gibbs模型外部，说明其受到人类活动的影响较大。地下水中 $Na^+/(Na^++Ca^{2+})$ 的变化范围在 0.61～0.92，$Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$ 的变化范围为 0.03～0.82；河水中 $Na^+/(Na^++Ca^{2+})$ 的变化范围在 0.57～0.75，$Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$ 的变化范围为 0.19～0.54，说明水体阳离子主要受蒸发结晶控制，而阴离子主要受岩石风化控制。



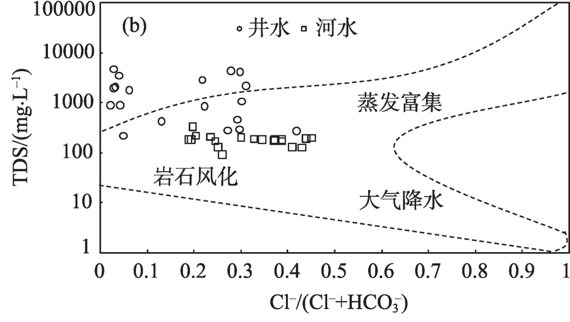


图4 乌尔逊河流域水体水化学Gibbs图

Fig. 4 Gibbs diagram of water chemistry in the Wuerxun River Basin

通过与全球大气降水线进行比较，发现呼伦湖流域的大气降水线的斜率较小，表明其蒸发作用强烈，这与水化学性质分析出的结果一致。由图5可以看出，当地的降水线斜率[9]明显小于全球大气降水线斜率，这是由于研究区处于受雨量效应、纬度效应等影响的半干旱地区，使得降水中氢、氧同位素发生强烈的同位素分馏[27]。河水及地下水 $\delta^{18}O-\delta D$ 的关系点全部位于当地降水线的下方，由于乌尔逊河所处的地形属于高平原区，坡度较为平缓，河流流速缓慢导致蒸发作用较大[28]。地下水及河水

均都接近当地大气降水线，表明各水体的水份来源于大气降水，只是因为降水补给的高程和径流途径不同而稍有差异。乌尔逊河流域的当地蒸发趋势线方程为$\delta D = 5.37\delta^{18}O-30$，而呼伦湖的蒸发趋势线斜率为5.53，克鲁伦河的蒸发趋势线斜率6.7[10]，说明乌尔逊河流域受到的蒸发作用要强于克鲁伦河流域，但与呼伦湖基本一致。乌尔逊河流域与克鲁伦河流域出现差异的原因，一方面是由于克鲁伦河的流域面积小于乌尔逊河流域，流域的表面积越大蒸发作用越明显，另一方面是由于克鲁伦河流域地形多是低山丘陵，而乌尔逊河流域多是冲积平原，流速缓慢的区域会使河流受到强烈的蒸发作用。由于不同水体蒸发强度不同，导致氢、氧同位素分异，沿当地蒸发趋势线发现河水的$\delta^{18}O-\delta D$关系点位于最上方，地下水的分布范围位于下方，说明地下水受到的蒸发作用相对较小，而河水中稳定同位素组成受到较大的蒸发分馏作用。从河水到地下水，δD和$\delta^{18}O$有逐渐偏负的趋势。

由图5可以发现，井1和井2明显偏离其他井水的同位素值，且其刚好处于入湖口附近，由于嵯岗断层在此横穿乌尔逊河，考虑出现这种情况的原因是存在其他水源对此进行补给。河3较其他河水取样点也存在一定的偏离，而这一点的TDS和Cl^-含量较各点偏大，存在其他水源进行补给的可能。河1的采样位置为乌尔逊河入湖口附近的甘珠花嘎查，该地是牧民牲畜饮水的集中地，人类活动极大程度的影响了同位素值。河15和河16异于其他取样点的原因是该段为河漫滩，受蒸发作用较明显，尤其是河15点正处于乌兰诺尔水泡处，流速缓慢，水力停留时间较长，使得该点受蒸发影响大，导致同位素过度分馏。

氘盈余值是蒸发效应对地下水物理化学性质的另一参考指数，也就是说，如果水体发生蒸发，氘盈余值大体会呈下降趋势[29]。氘盈余值也可以反映蒸发作用，即水体发生蒸发作用。一般而言，氘盈余接近于10为平衡过程，氘盈余偏离10为不平衡过程，表明有二次蒸发。河水的氘盈余偏负程度较大，说明受河水开阔水域面积的影响其受蒸发作用最为强烈。

由于水中的TDS和同位素具有相似的变化规律，因此可以利用水体中TDS的分布特征，来推测流域内河水和地下水的补给关系[12]。随着沿程的

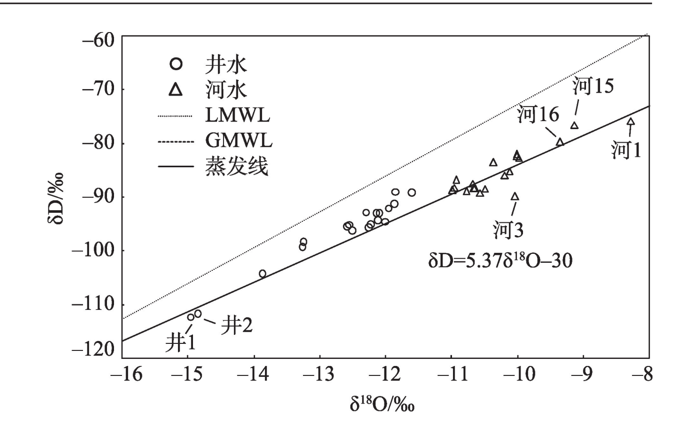


图5　乌尔逊河地下水与河水氢氧同位素关系

Fig. 5　Relationship between hydrogen and oxygen isotopes of groundwater and surface water in Wuerxun River

变化，受动力影响的蒸发作用再次加强，TDS含量会升高，同位素值也会增大，氘盈余会变小，水体中的盐分会变高[30]，由图6可知，河水的TDS整体变化较小，但在河1、河3处，分布由纵向转为横向，说明在沿水流流动的方向，尤其在入湖口附近同位素的分馏作用加剧[10]，除此之外，河1、河3处进入了甘珠花嘎查所在地的附近，牧民日常生活和牲畜的喂养依靠河水，这也表明除了受自然条件的影响外，人为因素也是影响同位素值变化的原因之一。乌尔逊河流域周围地下水的TDS与氘盈余之间呈现一个负相关的趋势，即随着TDS的增大，氘盈余逐渐减小，地下水TDS的变化较为显著，明确蒸发作用是导致地下水盐化的重要机制。井4、井2的TDS值偏高、氘盈余含量也偏高，说明这两处的蒸发作用相对于其他地方更强，使得该处盐化作用更明显，同时由于乌尔逊凹陷处多存在季节性盐碱泡，这是由于大型封闭洼地没有地下水的排泄通道，因此只能

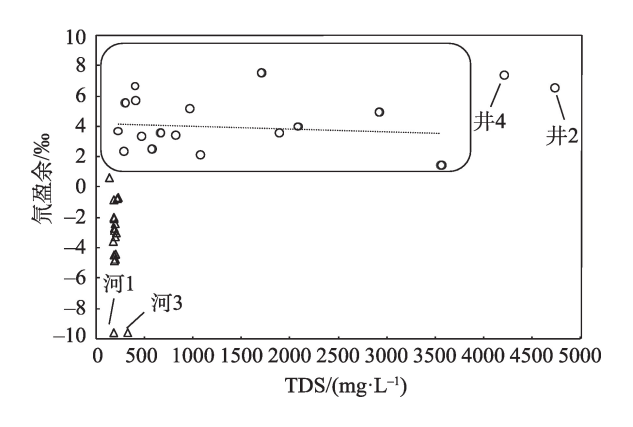


图6　河水及地下水氘盈余与TDS关系

Fig. 6　Relationship between surface water and groundwater *d*-excess and TDS

依靠蒸发作用进行排泄，这就使得盐分逐年积累形成了盐水泡。

3.3 地下水补给关系分析

3.3.1 流域内水体沿程变化 由图7可知，总体上乌尔逊河流域氢氧同位素值地下水贫于河水，指示地下水可能是乌尔逊河的另一主要补给来源之一，且同位素沿程变化幅度基本不大，在入湖口附近同位素的富集作用最为显著。这是由于流动缓慢、水力停留时间较长的河流极易发生稳定同位素的蒸发富集，加之取样时间为初春，天气较为干燥，降水稀少。

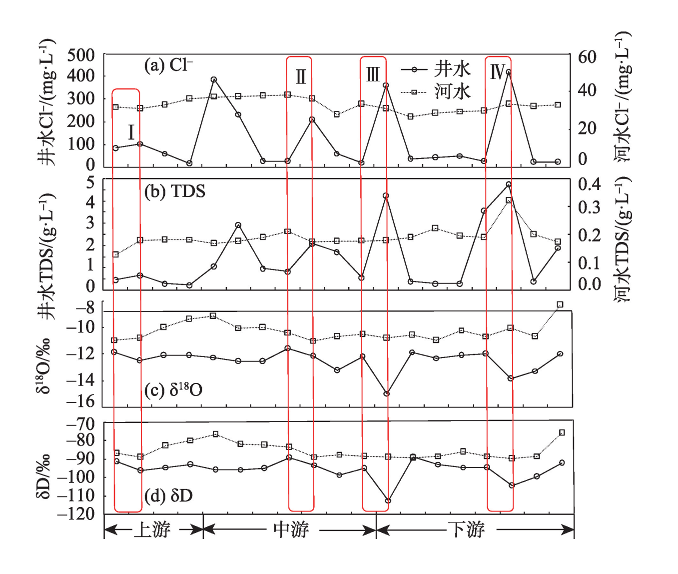


图7 河水及地下水Cl⁻、TDS、δD和δ¹⁸O的沿程变化

Fig. 7 Variation of Cl⁻, TDS, δD and δ¹⁸O in the surface water and groundwater

上游的地下水及河水δD和δ¹⁸O呈现幅度不大的富集过程，中游河水的δD和δ¹⁸O缓慢贫化，但地下水富集过程幅度较小，下游的河水含量几乎稳定，只是在入湖口处含量增加，而地下水的δD和δ¹⁸O则出现了两个“V”形区，最终也在入湖口处同位素值增加。总体上河水沿程的δD和δ¹⁸O值变化不大，而地下水的变化则有较大的幅度。

3.3.2 地下水转换分析 Cl⁻跟随着液相水，其迁移性质与水极为相似，在主要离子中只有氯的扩散系数与水最为接近，而且氯并不参与含水层中那些常有的地球化学反应，成为优良的守恒性示踪剂[31]。由图7可以明显看出，地下水的TDS及Cl⁻含量均大于河水。

上游地区，地下水的TDS先上升后下降，而河水的TDS有先上升后平稳的趋势；地下水的Cl⁻浓度同TDS变化一致，河水的Cl⁻浓度则有上升的趋势。Ⅰ区地下水Cl⁻和TDS变化相差不大，δD和δ¹⁸O变化较为显著，说明其间有一定的补给作用，从而发生一定的水力联系，表明地下水溢出补给河水，乌尔逊凹陷与贝尔凹陷相接处正存在于上游地区，此处含水层主要发育有孔隙水，推测地下水在Ⅰ区受到侧向孔隙水的补给。中游地区，地下水TDS与Cl⁻含量呈现相对一致的变化趋势，有两个“波峰”，而河水中的TDS有先增加后减小的变化过程，Cl⁻含量呈缓慢增加后减小。TDS与Cl⁻在Ⅱ区变化显著，δD和δ¹⁸O变化比较平缓，表明水力联系较强，该区域所处的位置，表明地下水会受到左侧径流及嵯岗隆起带附近发育的孔隙水的共同补给，而河水继续受地下水溢出补给。在中游与下游交接的位置（Ⅲ区）同样存在着地下水被补给的情况，考虑其处于乌尔逊凹陷与嵯岗断层之间，地下水的补给情况同Ⅱ区一致，水力联系密切。下游地区，地下水TDS变化较大，迅速减小后又迅速增加，Cl⁻含量与TDS呈现相对一致的变化状态；河水的TDS出现了两个“波峰”，总体上变化幅度不超过0.25 g·L⁻¹，Cl⁻含量则出现了一个下降趋势。Ⅳ区同Ⅲ区变化一致，TDS、Cl⁻、δD和δ¹⁸O变化均较为显著，表明该处水力联系密切。结合δD和δ¹⁸O的变化，在下游地区，地下水接受了来自高TDS与Cl⁻水源的补给，这也是井2和井4TDS偏高的原因。此时δD和δ¹⁸O也表现为更负，通过参考呼伦湖周边地质资料，发现嵯岗断层在此跨过乌尔逊河，由于受嵯岗隆起带作用，且处于高平原的位置上，该处地形平缓，地表岩石裸露、岩层节理裂隙发育，有利于直接渗入大气降水，且研究区蒸发作用强烈，通过地下水的更替，促进了矿化作用与Cl⁻的富集，所以考虑下游的地下水一方面受到强烈的蒸发作用，一方面接受了来自左侧断层发育的基岩裂隙水的补给。综上地下水主要依靠径流、左侧基岩裂隙水及孔隙水的共同补给，河水在此依靠地下水的补给。

3.4 河水补给比例分析

在此基于同位素守恒原理，以δ¹⁸O作为示踪剂，运用公式（2），计算地下水对河水的转换比例，充分了解河水与地下水的转化的关系。结合上述的分析，河水主要接受来自地下水和大气降水的共同补给。降水的δ¹⁸O按平均值计算为−7.53‰。上游段取河水δ¹⁸O的平均值为−10.26‰，地下水的平均

值-12.13‰,则河水接受地下水的补给比例为59.35%,接受大气降水的补给比例为40.65%。中游段取河水$\delta^{18}O$的均值为-10.23‰,地下水的均值-12.36‰,则河水接受地下水的补给比例为55.90%,接受大气降水的补给比例为44.10%。下游段取河水$\delta^{18}O$的均值为-10.26‰,地下水的均值-12.78‰,则河水接受地下水的补给比例为52.00%,接受大气降水的补给比例为48.00%。通过计算证明,地下水是河水主要的补给来源。

4 结 论

(1)通过对乌尔逊河流域地下水与河水的水化学性质研究得出,发现河水的水化学类型以Na·Ca-HCO_3型为主,地下水的水化学类型有Na-HCO_3和Na-HCO_3·Cl两种。河水中优势阳离子为Na^+、Ca^{2+},地下水中优势阳离子Na^+、Mg^{2+},两者的优势阴离子均为HCO_3^-、Cl^-、HCO_3^-和SO_4^{2-}。

(2)通过对水岩相互作用进行分析,发现河水受其影响较地下水更为显著。进一步分析后发现,水体中Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-、SO_4^{2-}主要来源于硅酸岩、石膏及白云岩的溶解和沉淀。Na^+、K^+、Cl^-主要来源于岩盐、钠、钾长石的风化溶解,HO_3^-主要与畜牧业的养殖活动有关。

(3)利用Gibbs模型,发现阳离子主要受蒸发结晶控制,阴离子主要受岩石风化控制。在此基础上对乌尔逊河流域地下水及河水氢氧同位素及氘盈余值进行分析,明确河水受蒸发作用要强于地下水。同时发现大气降水是地下水及河水的主要补给来源之一。

(4)在分析研究区内地下水及河水δD、$\delta^{18}O$、TDS及Cl^-含量的沿程变化分析出,地下水是乌尔逊河的主要补给来源,上、中、下游补给比例分别是59.35%、55.90%、52.00%。而地下水主要是受径流、左侧基岩裂隙水及孔隙水的共同补给。

参考文献(References):

[1] 周嘉欣, 丁永建, 曾国雄, 等. 疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3315-3324. [Zhou Jiaxin, Ding Yongjian, Zeng Guoxiong, et al. Major ion chemistry of surface water in the upper reach of Shule River Basin and the possible controls[J]. Environmental Science, 2014, 35(9): 3315-3324.]

[2] Chapman H, Bickle M, Thaw S H, et al. Chemical fluxes from time series sampling of the Irrawaddy and Salween Rivers, Myanmar[J]. Chemical Geology, 2015, 401: 15-27.

[3] 詹泸成, 陈建生, 张时音. 洞庭湖湖区降水-地表水-地下水同位素特征[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 327- 335. [Zhan Lucheng, Chen Jiansheng, Zhang Shiyin. Characteristic of stable isotopes in precipitation, surface water and groundwater in the Dongting Lake region[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 327-335.]

[4] Sun C, Chen Y, Li W, et al. Isotopic time series partitioning of streamflow components under regional climate change in the Urumqi River, Northwest China[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 2015, 61(8): 1443-1459.

[5] Li Zongxing, Qi Feng, Liu W, et al. Study on the contribution of cryosphere to runoff in the cold alpine basin: A case study of Hulugou River Basin in the Qilian Mountains[J]. Global & Planetary Change, 2014, 122: 345-361.

[6] Penna D, Meerveld H J V, Zuecco G, et al. Hydrological response of an Alpine catchment to rainfall and snowmelt events[J]. Journal of Hydrology, 2016, 537(3): 382-397.

[7] Li A J, Schmitz O J, Stephan S, et al. Photocatalytic transformation of acesulfame: Transformation products identification and embryotoxicity study[J]. Water Research, 2016, 89(1): 68-75.

[8] 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 等. 基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2624-2631. [Kong Xiaole, Wang Shiqin, Ding Fei, et al. Source of Nitrate in surface water and shallow groundwater around Baiyangdian Lake area based on hydrochemical and stable isotopes[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2624-2631.]

[9] 高宏斌, 李畅游, 孙标, 等. 呼伦湖流域氢氧稳定同位素特征及其对水体蒸发的指示作用[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 211-219. [Gao Hongbin, Li Changyou, Sun Biao, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes in Lake Hulun basin and its indicative function in evaporation[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(1): 211-219.]

[10] 韩知明, 贾克力, 史小红, 等. 克鲁伦河流域下游水体氢氧同位素与水化学特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 85-93. [Han Zhiming, Jia Keli, Shi Xiaohong, et al. Hydrochemical and hydrogen and oxygen isotopic characteristics of water in the low reach of Kherlen River[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 85-93.]

[11] 董焕忠. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷南部大磨拐河组油气来源及成藏机制[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 62-69. [Dong Huanzhong. Oil-gas source and reservoir-forming mechanism of the Damoguaihe formation in the southern Wuerxun sag, Hailar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 62-69.]

[12] 文广超, 王文科, 段磊, 等. 基于水化学和稳定同位素定量评价巴音河流域地表水与地下水转化关系[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 734-743. [Wen Guangchao, Wang Wenke, Duan Lei, et al. Quantitatively evaluating exchanging relationship between river water and groundwater in Bayin River Basin of Northwest China using hydrochemistry and stable isotope[J]. Arid Land Geography,

2018, 41(4): 734-743.]

[13] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.

[14] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO_2, consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. Chemical Geology, 1999, 159(1-4): 3-30.

[15] 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 等. 桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程[J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2099-2107. [Tang Wenkui, Tao Zhen, Gao Quanzhou, et al. Biogeochemical processes of the major ions and dissolved inorganic carbon in the Guijiang River[J]. Environmental Science, 2014, 35(6): 2099-2107.]

[16] 许琦, 李建鸿, 孙平安, 等. 西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2308-2316. [Xu Qi, Li Jianhong, Sun Ping'an, et al. Spatial variation and environmental significance of $\delta^{18}O$ and δD isotope composition in Xijiang River[J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2308-2316.]

[17] 尹观, 范晓, 郭建强, 等. 四川九寨沟水循环系统的同位素示踪[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 487-494. [Yin Guan, Fan Xiao, Guo Jianqiang, et al. Isotope tracer on water cycly system in Jiuzaigou, Sichuan[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(4): 487-494.]

[18] 尹观, 倪师军. 地下水氘过量参数的演化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001(4): 409-411. [Yin Guan, Ni Shijun. Deuterium excess parameter evolution in ground water[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2001(4): 409-411.]

[19] 冯欣, 张亚哲. 深州地区地下水离子比例系数分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(4): 18-20, 24. [Feng Xin, Zhang Yazhe. An analysis of the ions ratio coefficients of groundwater in Shenzhou area[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(4): 18-20, 24.]

[20] Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads[J]. American Journal of Science, 1987, 287(5): 401-428.

[21] 韩丹蕊, 孙启忠. 呼伦贝尔草原牧草青贮饲料硝酸盐与亚硝酸盐含量研究[J]. 草地学报, 2014, 22(6): 1360-1364. [Han Danrui, Sun Qizhong. Nitrate and Nitrite contents of forage silages from Hulunbuir grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(6): 1360-1364.]

[22] Desimone L A, Howes B L. Nitrogen transport and transformations in a shallow aquifer receiving wastewater discharge: A mass balance approach[J]. Water Resources Research, 1998, 34(2): 271-285.

[23] Schuh W M, Klinkebiel D L, Gardner J C, et al. Tracer and Nitrate movement to groundwater in the northern Great Plains[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(5): 1335-1347.

[24] Zhu G F, Su YH, Huang C L, et al. Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Heihe River Basin, Northwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(1): 139-153.

[25] 郭清海, 王焰新. 典型新生代断陷盆地内孔隙地下水地球化学过程及其模拟: 以山西太原盆地为例[J]. 地学前缘, 2014, 21(4): 83-90. [Guo Qinghai, Wang Yanxin. Simulation of geochemical processes affecting groundwater in Quaternary porous aquifers of Taiyuan basin: A typical Cenozoic rift basin[J]. Geoscience Front, 2014, 21(4): 83-90.]

[26] 吴卫华, 郑洪波, 杨杰东, 等. 中国河流流域化学风化和全球碳循环[J]. 第四纪研究, 2011, 31(3): 397-407. [Wu Weihua, Zhang Hongbo, Yang Jiedong, et al. Chemical weathering of Chinese river basins and the global carbon cycle[J]. Quaternary Research, 2011, 31(3): 397-407.]

[27] 范广群, 张德忠, 张建明, 等. 银川平原水体氢氧同位素及主要水化学参数特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1040-1049. [Fan Guangqun, Zhang Dezhong, Zhang Jianming, et al. Hydrogen and oxygen isotopes and hydrochemical parameters of water samples from the Yinchuan Plain[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1040-1049.]

[28] Hou S, Masson-Delmotte V, Qin Dahe, et al. Modern precipitation stable isotope vs. elevation gradients in the High Himalaya. Comment on "A new approach to stable isotope-based paleoaltimetry: implications for paleoaltimetry and paleohypsometry of the High Himalaya since the Late Miocene" by David B. Rowley et al[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2003, 209(3): 395-399.

[29] Han D M, Song X F, Currell M J, et al. A survey of groundwater levels and hydrogeochemistry in irrigated fields in the Karamay Agricultural Development Area, northwest China: Implications for soil and groundwater salinity resulting from surface water transfer for irrigation[J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(3): 217-234.

[30] 顾慰祖, 刘涌, 贺祥, 等. 阿拉善高原地下水的稳定同位素异常[J]. 水科学进展, 1998, 9(4): 22-26. [Gu Weizu, Liu Yong, He Xiang, et al. Isotopically anomalous groudwater of Alxa Plateau, Inner Mongolia[J]. Advances in Water Science, 1998, 9(4): 22-26.]

[31] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 292-293. [Gu Weizu. Isotope Hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2011: 292-293.]

Study on hydrochemical, hydrogen, and oxygen isotopic characteristics of water in the cold and arid region of Wuerxun River Basin

GUO Zi-yang, SHI Xiao-hong, LI Chang-you, ZHAO Sheng-nan, SUN Biao, LU Jun-ping, HAN Zhi-ming

(*College of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010018, *Inner Mongolia*, *China*)

Abstract: In this paper, water chemistry, and hydrogen and oxygen stable isotope techniques are used to analyze the water chemistry, as well as hydrogen and oxygen isotope characteristics of different types of water bodies in the Wuerxun River Basin through on-site testing and indoor analysis. Indicators of water chemistry, and hydrogen and oxygen isotopes in hydrological processes are discussed in this paper. Results showed that the water chemistry and type of surface water within the basin is dominated by Na·Ca-HCO_3 type; groundwater is dominated by Na-HCO_3 and Na-HCO_3·Cl. The water-rock interaction of river water in the basin is stronger than in groundwater, and the main ions in the Wuerxun River Basin come from the dissolution and precipitation of silicate rock, gypsum, and dolomite. These weathering and dissolution processes take place because of the presence of rock salt, sodium, and potassium feldspar, and the impact of some human activities. It was found that various ions are significantly affected by evaporation and weathering of rocks. Hydrogen and oxygen isotopes indicate that atmospheric precipitation is one of the main sources of river water and groundwater supply in the basin. The river in the study area is more strongly affected by evaporation than groundwater is. In order to fully understand the recharge relationship between river and groundwater in the Wuerxun River Basin, the variation of δD, $\delta^{18}O$, TDS, and Cl^- content was analyzed within the groundwater and river. The analysis showed that groundwater is recharged by runoff, fissure water from the bedrock on the left, and pore water. At the same time, groundwater is also the main source of recharge for the Wuerxun River Basin. The replenishment ratios at the upper, middle, and lower reaches are 59.35%, 55.90%, and 52.00% respectively.

Keywords: Wuerxun River Basin; hydrogen and oxygen isotope; water chemical characteristics; supply relationship